

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-072269

(43)Date of publication of application : 12.03.2002

(51)Int.Cl.

G02F 1/39
H01S 3/108

(21)Application number : 2000-261233

(71)Applicant : INST OF PHYSICAL & CHEMICAL RES

(22)Date of filing : 30.08.2000

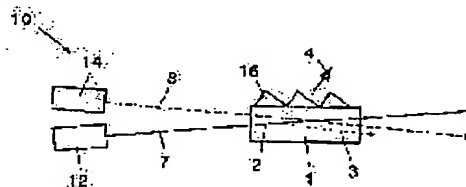
(72)Inventor : KAWASE AKIMICHI
ITO HIROMASA
YOMO JUNICHI

(54) METHOD AND DEVICE FOR GENERATING TERAHERTZ WAVE

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a method and a device for generation of terahertz waves such that the output of terahertz waves can be significantly increased in the generation of terahertz waves by the parametric effect in a nonlinear optical crystal under non-collinear phase matching conditions, that the spectral width can be further narrowed, moreover, that the wavelength of the generated terahertz waves is made variable, and that the generating direction of the waves can be maintained almost constant.

SOLUTION: The device is equipped with a nonlinear optical crystal 1 which can generate parametric oscillation, a first laser device 12 to emit first laser light 7 at a single frequency as pumping waves 2 to enter the nonlinear optical crystal, a second laser device 14 to emit another second laser light 8 at a single frequency to enter the crystal. The second laser light 8 is injected along the direction where idler waves are generated by the pumping waves.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-72269

(P2002-72269A)

(43) 公開日 平成14年3月12日 (2002.3.12)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テマコード* (参考)
G 0 2 F 1/39		G 0 2 F 1/39	2 K 0 0 2
H 0 1 S 3/108		H 0 1 S 3/108	5 F 0 7 2

審査請求 未請求 請求項の数9 O L (全 8 頁)

(21) 出願番号 特願2000-261233 (P2000-261233)

(22) 出願日 平成12年8月30日 (2000.8.30)

(71) 出願人 000006792

理化学研究所

埼玉県和光市広沢2番1号

(72) 発明者 川瀬 晃道

宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉519-1399

理化学研究所 フォトダイナミクス研究
センター内

(72) 発明者 伊藤 弘昌

宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉519-1399

理化学研究所 フォトダイナミクス研究
センター内

(74) 代理人 100097515

弁理士 堀田 実

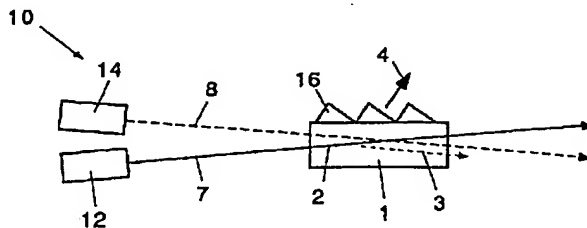
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 テラヘルツ波発生方法及び装置

(57) 【要約】

【課題】 非線形光学結晶中のノンコリニア位相整合条件のパラメトリック効果によるテラヘルツ波の発生において、テラヘルツ波の出力を大幅に増大でき、かつそのスペクトル幅をより狭線化することができ、更に、発生したテラヘルツ波の波長を可変にでき、かつその発生方向をほぼ一定に保持することができるテラヘルツ波発生方法及び装置を提供する。

【解決手段】 パラメトリック発振可能な非線形光学結晶1と、非線形光学結晶内にポンプ波2として単一周波数の第1レーザー光7を入射する第1レーザー装置12と、単一周波数の別の第2レーザー光8を入射する第2レーザー装置14とを備え、ポンプ波により発生するアイドラー波の発生方向に第2レーザー光8を光注入する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 パラメトリック効果によってテラヘルツ波発生が可能な非線形光学結晶(1)内にポンプ波

(2)を入射し、ノンコリニア位相整合条件を満たす方向にアイドラー波(3)とテラヘルツ波(4)を発生させるテラヘルツ波発生方法であって、

前記ポンプ波として単一周波数の第1レーザー光(7)を使用し、かつ、前記アイドラー波の発生方向に単一周波数の別の第2レーザー光(8)を光注入する、ことを特徴とするテラヘルツ波発生方法。

【請求項2】 前記光注入する第2レーザー光(8)の波長を変化させて、テラヘルツ波の波長を変化させる、ことを特徴とする請求項1に記載のテラヘルツ波発生方法。

【請求項3】 前記非線形光学結晶表面にテラヘルツ波帯で屈折率変化の小さい材料のプリズム結合器(16)を少なくとも1つ配置し、これによりテラヘルツ波の波長変化に伴う放射角変化を低減する、ことを特徴とする請求項1に記載のテラヘルツ波発生方法。

【請求項4】 前記第1レーザー光(7)及び第2レーザー光(8)を前記非線形光学結晶の一端面又は両端面で反射させて複数回通過させ、これにより、テラヘルツ波の出力強度を高める、ことを特徴とする請求項1に記載のテラヘルツ波発生方法。

【請求項5】 パラメトリック効果によってテラヘルツ波発生が可能な非線形光学結晶(1)と、該非線形光学結晶内にポンプ波(2)として単一周波数の第1レーザー光(7)を入射する第1レーザー装置(12)と、ポンプ波により発生するアイドラー波の発生方向に単一周波数の別の第2レーザー光(8)を光注入する第2レーザー装置(14)とを備えた、ことを特徴とするテラヘルツ波発生装置。

【請求項6】 前記第2レーザー装置(14)は、光注入に用いる第2レーザー光(8)の波長を変えることができる可変波長レーザー装置である、ことを特徴とする請求項5に記載のテラヘルツ波発生装置。

【請求項7】 前記非線形光学結晶表面に配置された少なくとも1つのプリズム結合器(16)を備え、該プリズム結合器は、テラヘルツ波帯で屈折率変化の小さい材料からなる、ことを特徴とする請求項5に記載のテラヘルツ波発生装置。

【請求項8】 前記非線形光学結晶(1)はその両面に少なくとも部分的に反射面(1a、1b)を有し、該反射面(1a、1b)で前記第1レーザー光(7)及び第2レーザー光(8)が反射して複数回非線形光学結晶内を通過するように構成されている、ことを特徴とする請求項5に記載のテラヘルツ波発生装置。

【請求項9】 高反射コーティングを施した1対のミラー(18a、18b)からなりアイドラー波(3)を増幅する共振器(18)を備える、ことを特徴とする請求

項5に記載のテラヘルツ波発生装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、テラヘルツ波発生方法及び装置に関する。

【0002】

【従来の技術】遠赤外線あるいはサブミリ波の領域は、光波と電波の境界に位置しており、光波と電波がそれぞれの領域で発展してきたのとは対比的に、技術面及び応用面の両面で未開拓の分野として取り残されていた。しかし、無線通信における周波数帯の有効利用や超高速通信への対応、およびこの周波数帯の電磁波の特徴を生かしたイメージングやトモグラフィによる環境計測、そして生物や医学への応用など、この領域は近年ますます重要となってきた。以下、遠赤外線及びサブミリ波を「テラヘルツ波」と呼ぶ。

【0003】テラヘルツ波は発生・検出ともに困難であり、従来は、(A)自由電子レーザー、(B)後進波管、(C)p-Geレーザー、等の手段によりテラヘルツ波を発生させていた。自由電子レーザーは、原理的に任意の波長のテラヘルツ波を発生可能であるが、1THz付近での発振には光波帯よりもはるかに長い電子バンチが必要となり、10メートル規模の大型装置となり、高価であるばかりか使用に際し不便である問題点があった。後進波管(BWO: Backward Oscillator)は、スペクトル純度に優れ、数百GHz帯では有用であるが、1THzより高周波側で波長可変性が急減する問題点があった。p-Geレーザーは、液体ヘリウムで冷却が必要な極低温を要するため、その設備が大型となり、使用上不便であった。

【0004】従って、従来のテラヘルツ波発生手段は、いずれも実験室レベルでは一部使用可能であるが、大型かつ高価であり、或いは使用上の不便が多く、多種多様な応用研究のニーズを満たすほど実用的かつ簡便ではなかった。

【0005】上述した従来のテラヘルツ波発生手段に対して、1~2THz帯で波長可変であり、かつ小型レーザー装置で作動可能な常温動作のテラヘルツ波発生手段が、本発明の発明者等によって以下の参考資料に報告されている。

【0006】(参考資料1)特開平9-146131号公報

(参考資料2) Unidirectional radiation of widely tunable THz wave using a prism coupler under noncollinear phase matching condition, 1997 American Institute of Physics, 11 August 1997

(参考資料3)「パラメトリック発振による波長可変テ

ラヘルツ電磁波の発生と応用」、レーザー研究、1998年7月

（参考資料4）MgO:LiNbO₃を用いたTHz波パラメトリック特性の検討」、電子情報通信学会誌文誌、2000年4月

【0007】図9は、このテラヘルツ波の発生原理図である。この図において、1は非線形光学結晶（例えばLiNbO₃）、2はポンプ波（例えばYAGレーザー光）、3はアイドラー波、4はテラヘルツ波である。ラマン活性かつ遠赤外活性を有する非線形光学結晶1にポンプ波2を一定方向に入射すると、誘導ラマン効果（又はパラメトリック相互作用）により物質の素励起波（ポラリトン）を介してアイドラー波3とテラヘルツ波4が発生する。この場合、ポンプ波2（ ω_p ）、テラヘルツ波4（ ω_T ）、アイドラー波3（ ω_i ）の間には、式

（1）で示すエネルギー保存則と式（2）で示す運動量保存則（位相整合条件）が成り立つ。なお、式（2）はベクトルであり、ノンコリニアな位相整合条件は、図9の右上に示すように表現できる。

$$\omega_p = \omega_T + \omega_i \dots (1)$$

$$\kappa_p = \kappa_T + \kappa_i \dots (2)$$

【0009】このとき発生するアイドラー波3とテラヘルツ波4は空間的な広がりを持ち、その出射角度に応じてそれらの波長は連続的に変化する。このシングルパス配置におけるブロードなアイドラー波及びテラヘルツ波の発生をTPG（THz-wave Parametric Generation）と呼ぶ。なお、基本的な光パラメトリック過程は、1個のポンプ光子の消滅と、1個のアイドラー光子および1個のシグナル光子の同時生成によって定義される。アイドラー光あるいはシグナル光が共振する場合、ポンプ光強度が一定のしきい値を超えるとパラメトリック発振が生じる。また、1個のポンプ光子の消滅と、1個のアイドラー光子および1個のポラリトンの同時生成が誘導ラマン散乱であり、広義のパラメトリック相互作用に含まれる。

【0010】しかし、図9に示したシングルパス配置のテラヘルツ波発生装置で発生したテラヘルツ波は非常に微弱であり、しかもその大部分は、非線形光学結晶中を数百 μ m進む間に吸収されてしまうという問題があった。

【0011】図10はこの問題を解決したテラヘルツ波発生装置の構成図である。この図に示すように、上述したブロードなアイドラー波3に対して特定方向（角度 θ ）に共振器を構成することで、特定方向のアイドラー波3の強度を高めることができる。この場合、共振器は高反射コーティングを施したミラーM1とM2からなり、回転ステージ5上にセットされ、共振器の角度を微調整することができる。また、2枚のミラーM1、M2はその半分のみに高反射コーティングを施し、残りは素通しでポンプ波2が通過するようになっている。なお、

図10で6はテラヘルツ波4を外に取り出すためのプリズム結合器である。

【0012】図10に示したテラヘルツ波発生装置において、ポンプ波の結晶への入射角 θ をある範囲（例えば $1 \sim 2^\circ$ ）で変えると、結晶中でのポンプ波とアイドラー波のなす角が変化し、テラヘルツ波とアイドラー波のなす角度も変化する。この位相整合条件の変化により、テラヘルツ波は例えば約 $140 \sim 310 \mu$ mの間で連続波長可変性を備える。

【0013】

【発明が解決しようとする課題】上述したように、図9に示したシングルパス配置のテラヘルツ波発生装置で発生したテラヘルツ波は非常に微弱であり、例えば、励起強度 45 mJ/pulse の強力なNd:YAGレーザーをポンプ光として用いた場合でも、テラヘルツ波の強度は 2 pJ/pulse 程度に過ぎなかった。

【0014】また、図10に示した共振器を有するテラヘルツ波発生装置の場合には、テラヘルツ波の発生強度をシングルパス配置の数倍には高めることができるが、その発振スペクトル幅が広く（例えば約 15 GHz ）、種々の計測に用いるにはその有用性が低かった。また、この装置では、共振器を回転させる回転ステージ5の駆動機構が複雑となり、かつ共振器自体の調整が煩雑であった。

【0015】本発明は、かかる問題点を解決するために創案されたものである。すなわち本発明の目的は、非線形光学結晶中のノンコリニア位相整合条件のパラメトリック発振によるテラヘルツ波の発生において、テラヘルツ波の出力を大幅に増大でき、かつそのスペクトル幅をより狭線化することができるテラヘルツ波発生方法及び装置を提供することにある。また、本発明の別の目的は、発生したテラヘルツ波の波長を可変にでき、かつその発生方向をほぼ一定に保持することができるテラヘルツ波発生方法及び装置を提供することにある。

【0016】

【課題を解決するための手段】本発明の発明者等は、非線形光学結晶中のノンコリニア位相整合条件のパラメトリック発振において、単一周波数のレーザー光で励起し、かつ、ストークス光（アイドラー波）に対して単一周波数のレーザー光で光注入を行うことにより、発生するテラヘルツ波のスペクトル幅を励起光と光注入光のそれぞれのスペクトル幅の和程度まで狭線化でき、かつテラヘルツ波出力が大幅に増大する現象を世界で初めて確認した。本発明はかかる新規の知見に基づくものである。

【0017】すなわち、本発明によれば、パラメトリック発振可能な非線形光学結晶（1）内にポンプ波（2）を入射し、ノンコリニア位相整合条件を満たす方向にアイドラー波（3）とテラヘルツ波（4）を発生させるテラヘルツ波発生方法であって、前記ポンプ波として単一

周波数の第1レーザー光(7)を使用し、かつ、前記アイドラー波の発生方向に単一周波数の別の第2レーザー光(8)を光注入する、ことを特徴とするテラヘルツ波発生方法が提供される。

【0018】また、本発明によれば、パラメトリック発振可能な非線形光学結晶(1)と、該非線形光学結晶内にポンプ波(2)として単一周波数の第1レーザー光(7)を入射する第1レーザー装置(12)と、ポンプ波により発生するアイドラー波の発生方向に単一周波数の別の第2レーザー光(8)を光注入する第2レーザー装置(14)とを備えた、ことを特徴とするテラヘルツ波発生装置が提供される。

【0019】上記本発明の方法及び装置によれば、第2レーザー装置(14)を用いてポンプ波により発生するアイドラー波(3)の発生方向に単一周波数の別の第2レーザー光(8)を光注入するので、パラメトリック相互作用のみで非線形光学結晶内にアイドラー波を発生させるよりも、強いアイドラー波を発生することができる。これにより、この方向のアイドラー波(3)の光強度が高まり、ノンコリニアな位相整合条件を満たすテラヘルツ波(4)の強度も大幅に高まることが実験により確認された。また、第2レーザー光(8)で強化されるアイドラー波(3)の指向性が強く、かつ第1レーザー光(7)と第2レーザー光(8)の両方が単一周波数のレーザー光であるので、発生するテラヘルツ波(4)の発生方向の指向性が高まるばかりでなく、スペクトル幅も大幅に狭線化できることが同様に実験により確認された。

【0020】本発明の好ましい実施形態によれば、前記第2レーザー装置(14)は、光注入に用いる第2レーザー光(8)の波長を変えることができる可変波長レーザー装置であり、前記光注入する第2レーザー光(8)の波長を変化させて、テラヘルツ波の波長を変化させる。この方法及び装置により、従来のように回転ステージ5を設けてこれを回転させることなくテラヘルツ波の波長を変化させることもできる。従って、機構を簡潔にできるばかりでなく、テラヘルツ波を適用する計測システムの調整をより容易にすることができる。

【0021】また、前記非線形光学結晶表面に配置された少なくとも1つのプリズム結合器(16)を備え、このプリズム結合器をテラヘルツ波帯で屈折率変化の小さい材料から構成して、テラヘルツ波の波長変化に伴う放射角変化を低減することが好ましい。かかる材料として、シリコン(Si)をプリズム結合器に用いることにより、テラヘルツ波の波長を約150~300 μ mの範囲で変化させても、発生したテラヘルツ波の放射角がほとんど変化しないことを、解析により確認した。従って、テラヘルツ波の発生方向を一定化し、テラヘルツ波を適用する計測システムの調整を更に簡潔にすることができる。

【0022】本発明の第2の実施形態によれば、前記非線形光学結晶(1)はその両面に少なくとも部分的に反射面(1a, 1b)を有し、該反射面(1a, 1b)で前記第1レーザー光(7)及び第2レーザー光(8)が反射して複数回非線形光学結晶内を通過するように構成され、前記第1レーザー光(7)及び第2レーザー光(8)を前記非線形光学結晶の一端面又は両端面で反射させて複数回通過させ、これにより、テラヘルツ波の出力強度を高める。従って、この方法及び装置により、同一の非線形光学結晶(1)内を複数回第1レーザー光(7)及び第2レーザー光(8)が通過し、テラヘルツ波の発生強度をその分高めることができる。

【0023】本発明の第3の実施形態によれば、高反射コーティングを施した1対のミラー(18a, 18b)からなりアイドラー波(3)を増幅する共振器(18)を備える。この構成により、共振器(18)のミラー(18a, 18b)でアイドラー波(3)の強度を更に高め、発生するテラヘルツ波の強度を更に高めることができる。

【0024】

【発明の実施の形態】以下に本発明の好ましい実施形態を図面を参照して説明する。なお、各図において、共通する部分には同一の符号を付し重複した説明を省略する。

【0025】図1は、本発明のテラヘルツ波発生装置の第1実施形態図である。この図に示すように、本発明のテラヘルツ波発生装置10は、非線形光学結晶1、第1レーザー装置12、及び第2レーザー装置14を備える。非線形光学結晶1は、パラメトリック発振可能な結晶であり、例えば、 LiNbO_3 、 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ (MgO ドープ LiNbO_3)を用いることができる。その他の非線形光学結晶1としては、 LiTaO_3 、 Nd ドープ LiNbO_3 、 Nd ドープ LiTaO_3 、等を用いてもよい。第1レーザー装置12は、非線形光学結晶1内にポンプ波2として単一周波数の第1レーザー光7を入射する。この第1レーザー装置12は、例えば単一縦モードの Qsw Nd:YAG レーザーであり、第1レーザー光7として1064nm, 15nsのパルスレーザー光を出力する。この第1レーザー光7の出力は強いほどよく、例えば45mJ/pulseのものを使用する。第2レーザー装置14は、ポンプ波2により発生するアイドラー波3の発生方向に単一周波数の別の第2レーザー光8を光注入する。この第2レーザー装置14は、例えば単一縦モードのYbファイバーレーザーであり、第2レーザー光8として1070.2nmの連続レーザー光を出力する。この第2レーザー光8の出力も強いほどよく、例えば250mWのものを使用する。ポンプ波2によりパラメトリック相互作用で誘起されるアイドラー波3の発生方向は、実際にはブロードであるため、第1レーザー光7と第2レーザー光8のなす角度 θ

も、約 $1\sim 2^\circ$ の範囲で設定でき、例えば、その中間の 1.5° 前後に設定する。

【0026】上述した第1実施形態のテラヘルツ波発生装置10を用い、本発明の方法によれば、ポンプ波2として単一周波数の第1レーザー光7を非線形光学結晶1内に入射し、かつ、アイドラー波3の発生方向に単一周波数の別の第2レーザー光8を光注入して、ノンコリニア位相整合条件を満たす方向にアイドラー波3とテラヘルツ波4を発生させる。

【0027】上記本発明の方法及び装置によれば、アイドラー波3の発生方向に単一周波数の別の第2レーザー光8を光注入するので、パラメトリック相互作用のみで非線形光学結晶内にアイドラー波を発生させるよりも、強いアイドラー波を発生させることができる。これにより、この方向のアイドラー波3の光強度が高まり、ノンコリニアな位相整合条件を満たすテラヘルツ波4の強度も後述する図5に示すように大幅に増大する。また、第2レーザー光8で強化されるアイドラー波3の指向性が強く、かつ第1レーザー光7と第2レーザー光8の両方が単一周波数のレーザー光であるので、発生するテラヘルツ波4の発生方向の指向性が高まるばかりでなく、スペクトル幅も後述する図6に示すように大幅に狭線化できる。

【0028】図1の第1実施形態において、第2レーザー装置14は、光注入に用いる第2レーザー光8の波長を変えることができる可変波長レーザー装置であるのがよい。かかる可変波長レーザー装置を用い、光注入する第2レーザー光8の波長を変化させることにより、テラヘルツ波の波長を変化させる。この方法及び装置により、後述する図7に示すように、第1レーザー光7と第2レーザー光8のなす角度 θ を約 $1.2^\circ\sim 1.7^\circ$ まで変化させても、この変化にテラヘルツ波の出力は鈍感であることから、逆にこの角度 θ を固定したままで、テラヘルツ波の波長を変化させることができる。従って、機構を簡潔にできるばかりでなく、テラヘルツ波を適用する計測システムの調整をより容易にすることができる。

【0029】図1において、本発明のテラヘルツ波発生装置10は、更に非線形光学結晶1の表面（テラヘルツ波の発生側）に配置された少なくとも1つ（この例では3つ）のプリズム結合器16を備える。また、このプリズム結合器16は、テラヘルツ波帯で屈折率変化の小さい材料からなる。かかる材料として、シリコン（Si）をプリズム結合器に用いることにより、テラヘルツ波の波長を約 $150\sim 300\mu\text{m}$ の範囲で変化させても、発生したテラヘルツ波の放射角がほとんど変化しないことを、上述した（参考資料2）において解析により確認した。従って、この方法及び構成を本発明のテラヘルツ波発生手段に組み合わせることにより、テラヘルツ波の発生方向を一定化し、テラヘルツ波を適用する計測システ

ムの調整を簡潔にすることができる。

【0030】図2は、本発明のテラヘルツ波発生装置の第2実施形態図である。この図において、（A）は側面図、（B）はそのB-B矢視図である。この実施形態において、非線形光学結晶1は、その両面に少なくとも部分的に反射面1a、1bを有する。この反射面1a、1bは、第1レーザー光7及び第2レーザー光8が反射して複数回同一の非線形光学結晶内を通過するように構成されている。なお、図2において、反射面1a、1bを非線形光学結晶1から離して示しているが、非線形光学結晶1の端面に直接高反射コーティングを施してもよい。その他の構成は、第1実施形態と同様である。この構成により、第1レーザー光7及び第2レーザー光8を非線形光学結晶の端面で反射させて複数回通過させ、これにより、テラヘルツ波の出力強度を高める。この方法及び装置により、同一の非線形光学結晶1内を複数回第1レーザー光7及び第2レーザー光8を通過させることができ、後述する実施例の図4のように、複数の非線形光学結晶を用いることなく、単一の非線形光学結晶でテラヘルツ波の発生強度を複数倍に高めることができる。

【0031】図3は、本発明のテラヘルツ波発生装置の第3実施形態図である。この実施形態において、本発明のテラヘルツ波発生装置10は、共振器18を備える。この共振器18は、高反射コーティングを施した1対のミラー18a、18bからなりアイドラー波3を増幅するようになっている。この構成により、共振器を用いない簡潔さは失われるが、共振器18のミラー18a、18bでアイドラー波3の強度を更に高め、発生するテラヘルツ波の強度を更に高めることができる。

【0032】

【実施例】図4は、本発明のテラヘルツ波発生装置の実施例の構成図である。この図において、1、1'は非線形光学結晶、17は望遠鏡（レンズ系）、18a、18bはミラー、19はメタルメッシュエタロン、20はポロメーターである。この実施例において、 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 結晶（65mm長）の非線形光学結晶1と、 LiNbO_3 結晶（65mm長）の非線形光学結晶1'を縦に配置し、テラヘルツ波4はSiプリズムアレイ16から取り出した。2つの非線形光学結晶1、1'を縦に配置したのは、非線形光学結晶の効果を高めるためである。ポンプ光7は単一縦モードの $\text{Q}_{\text{sw}}\text{Nd}:\text{YAG}$ レーザー12（1064nm、15ns）、アイドラー光の種光8は単一縦モードのYbファイバーレーザー14（1070、2nm）で、位相整合角 1.5° で入射した。テラヘルツ波4の検出にはショットキーバリアダイオード及びSiポロメータ20をテラヘルツ波減衰用のカバーガラス2枚（図示せず）とともに用いた。

【0033】上述した実施例により発生したアイドラー光の波長は、注入光と一致した。また、テラヘルツ波4

の波長は $184\mu\text{m}$ であった。メタルメッシュエタロン間隔を 200mm (FSR 750MHz) に広げ、テラヘルツ波の線幅 230MHz まで確認できた。ポンプ光強度 45mJ/pulse (発振しきい値は 29mJ/pulse)、注入光強度 250mW に対してテラヘルツ波強度 0.9nJ/pulse (ピーク値 260mW 、パルス幅 3.4ns)を得た。これはTPOから得られた従来の最大出力 0.19nJ/pulse (ピーク値 19mW)を大幅に上回っていた。なお、種光(第2レーザー光8)を遮るとテラヘルツ波4の強度は約300分の1に減少することが確認された。

【0034】上述した実施例から、共振器を用いないテラヘルツパラメトリック発生 (THz Parametric Generation: TPG) に、ポンプ光とアイドラー光への光注入を導入することで、テラヘルツ波のフーリエ限界近い狭線化と大幅な放射強度の増大が達成できることが確認された。

【0035】図5は、上述した本発明の実施例によるテラヘルツ波の発生強度を示す図である。この図において、横軸は励起レーザー強度、縦軸はテラヘルツ波の発生強度であり、図中の上線が本発明、下線が従来例を示している。この従来例は共振器のないシングルパス配置の場合であるが、これに比べて約300倍の出力増大が達成されていることがわかる。この出力は、共振器を有する場合に比べても大幅に高い出力である。

【0036】図6は、本発明の実施例によるテラヘルツ波のスペクトル幅を示す図である。この図において、(A)は本発明の場合、(B)は従来例である。この図の比較から明らかなように、本発明のテラヘルツ波発生方法及び装置では、スペクトル幅が大幅に狭線化されている。また、この図からは明らかではないが、本発明により発生したテラヘルツ波の線幅は、パルス幅によって決まるフーリエ限界に近い優れたものであることが確認されている。

【0037】図7は、位相整合角とテラヘルツ波の発生強度との関係図である。この図に示すように、第1レーザー光7と第2レーザー光8のなす角度 θ (位相整合角)を約 1.2° ～約 1.7° まで変化させても、この変化にテラヘルツ波の出力は鈍感であることがわかる。従って、逆にこの角度 θ を固定したままで、光注入する第2レーザー光8の波長を変化させることにより、テラヘルツ波の波長を変化させることができることがわかる。

【0038】図8は、(参考資料2)において解析したテラヘルツ波の波長とその発生方向との関係図である。シリコン (Si) をプリズム結合器16に用いることにより、テラヘルツ波の波長を約 $150\sim 300\mu\text{m}$ の範囲で変化させても、発生したテラヘルツ波の放射角がほとんど変化しないことがわかる。なお、その後の厳密な解析により、わずかな変化があることがわかっている。

従って、この構成を本発明のテラヘルツ波発生手段に組み合わせることにより、テラヘルツ波の発生方向を一定化できることがわかる。

【0039】なお、本発明は上述した実施形態に限定されず、本発明の要旨を逸脱しない範囲で種々変更できることは勿論である。

【0040】

【発明の効果】上述したように、本発明では、単一周波数のレーザー光で非線形光学結晶を励起し、さらにテラヘルツ波と同時に発生するストークス光に対して単一周波数のレーザー光で光注入を行う。従来の非線形光学結晶中のノンコリニア位相整合条件のパラメトリック発振によるテラヘルツ波発生装置において、テラヘルツ波のスペクトル幅が広いこと、およびテラヘルツ波出力が小さいことが実用上の欠点であったが、本発明により、テラヘルツ波スペクトル幅は従来の数百分の1程度まで狭線化され、かつテラヘルツ波出力は従来の数百倍程度に増大する。また、光注入の入射角を変えずに注入光の波長のみを変えることにより、テラヘルツ波の波長可変性が得られる。更に、結晶内の多重回往復による変換効率の増大を図ることもできる。

【0041】従って、本発明のテラヘルツ波発生方法及び装置は、非線形光学結晶中のノンコリニア位相整合条件のパラメトリック発振によるテラヘルツ波の発生において、テラヘルツ波の出力を大幅に増大でき、かつそのスペクトル幅をより狭線化することができ、更に、発生したテラヘルツ波の波長を可変にでき、かつその発生方向をほぼ一定に保持することができる、等の優れた効果を有する。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明のテラヘルツ波発生装置の第1実施形態図である。

【図2】本発明のテラヘルツ波発生装置の第2実施形態図である。

【図3】本発明のテラヘルツ波発生装置の第3実施形態図である。

【図4】本発明のテラヘルツ波発生装置の実施例の構成図である。

【図5】本発明の実施例によるテラヘルツ波の発生強度を示す図である。

【図6】本発明の実施例によるテラヘルツ波のスペクトル幅を示す図である。

【図7】位相整合角とテラヘルツ波の発生強度との関係図である。

【図8】テラヘルツ波の波長とその発生方向との関係図である。

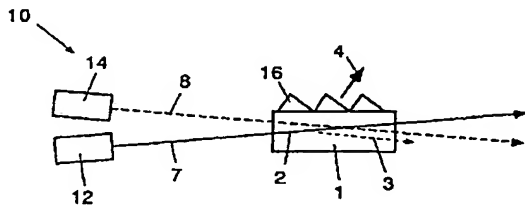
【図9】テラヘルツ波の発生原理図である。

【図10】共振器を有する従来のテラヘルツ波発生装置の構成図である。

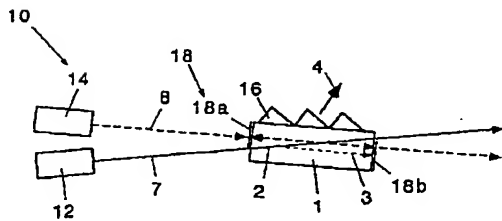
【符号の説明】

1, 1' 非線形光学結晶、2 ポンプ波、3 アイドラー波、4 テラヘルツ波、5 回転ステージ、6 プリズム結合器、7 第1レーザー光、8 第2レーザー光、10 テラヘルツ波発生装置、12 第1レーザー装置、14 第2レーザー装置、16 プリズム結合器、17 テレスコープ（レンズ系）、18a, 18b ミラー、19 メタルメッシュエタロン、20 ボロメーター、

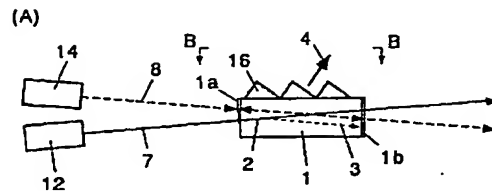
【図1】



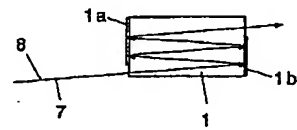
【図3】



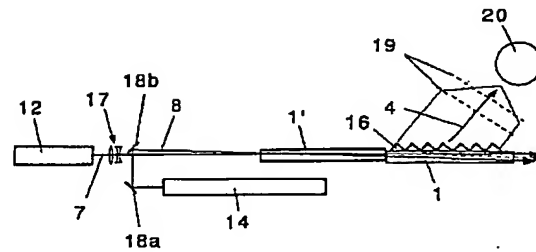
【図2】



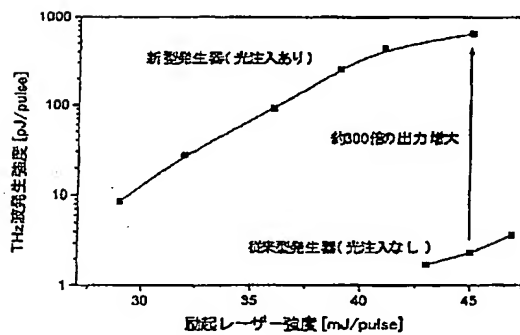
(B)



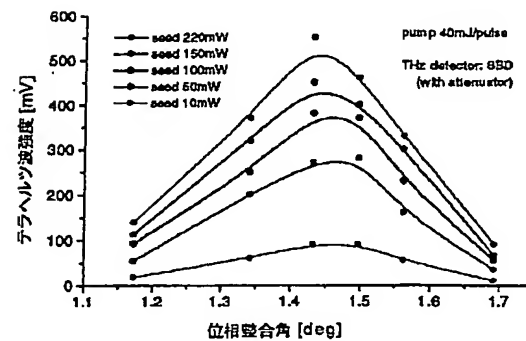
【図4】



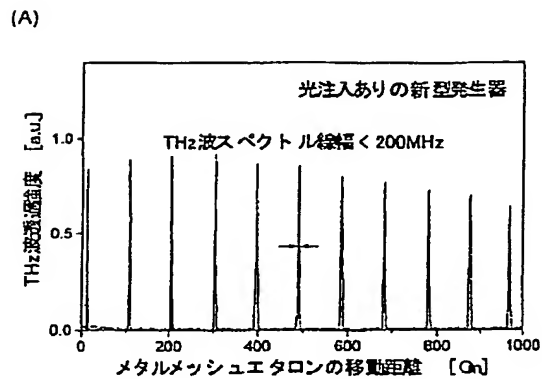
【図5】



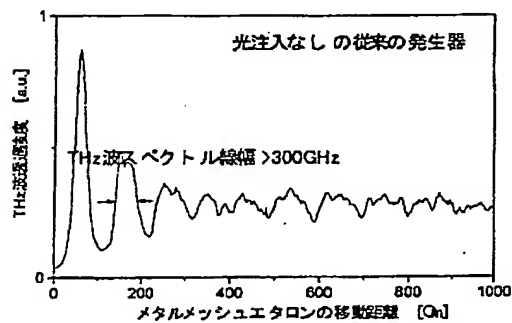
【図7】



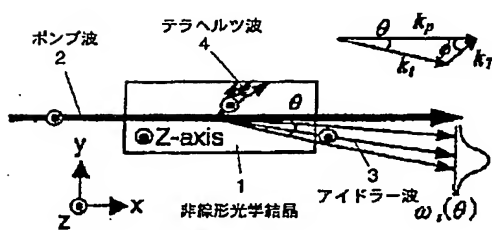
【図6】



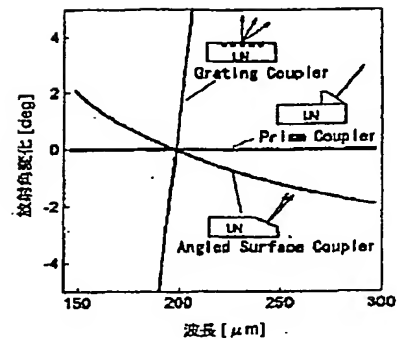
(B)



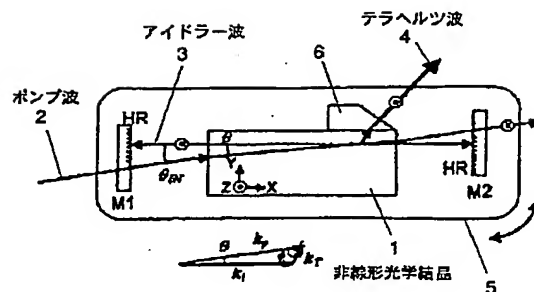
【図9】



【図8】



【図10】



フロントページの続き

(72)発明者 四方 潤一
宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉519-1399
理化学研究所 フォトダイナミクス研究
センター内

Fターム(参考) 2K002 AB12 AB27 BA02 CA03 DA01
GA10 HA21
5F072 AB20 JJ04 JJ20 KK11 KK30
PP10 QQ03